

BRZE SIMULACIJE POMORSTVENOSTI BRODA U OPENFOAM-U

Gatin, I., Vukčević, V., & Jasak, H.

Sažetak U ovom radu su prikazane mogućnosti brzih i točnih simulacija pomorstvenosti broda u programskom paketu Naval Hydro u sklopu programa računalne dinamike fluida (eng. “*Computational Fluid Dynamics*”, CFD) otvorenog koda foam-extend. Naval Hydro je programski paket specijaliziran za modeliranje dvofaznog, viskoznog i turbulentnog strujanja na velikim prostornim skalama. U programu se koristi eksplicitan tretman propagacije valova što olakšava modeliranje valova uz smanjenje numeričke greške difuzije i disperzije. Dodatnom spregom jednadžbe tlaka i jednadžbi gibanja krutog tijela omogućeno je korištenje manjeg broja iteracija algoritma, što znatno smanjuje vrijeme proračuna. Da bi se prikazala brzina proračuna u odnosu na uobičajene CFD proračune pomorstvenosti, napravljena je komparativna studija između uobičajenih postavki simulacija broda na valovima i postavki za minimizaciju proračunskog vremena, te su rezultati uspoređeni sa eksperimentom. Smanjenje vremena proračuna umanjuje i točnost rezultata, međutim ovaj pristup može biti vrlo koristan za optimizaciju brodske forme s obzirom na otpor na valovima.

Ključne riječi: Računalna dinamika fluida, brodska hidrodinamika, pomorstvenost broda, foam-extend.

1 UVOD

Procjena dinamičkih karakteristika pomorskih objekata na valovima, tj. pomorstvenosti, vrlo je važan problem u brodogradnji. Dobra pomorstvenost broda preduvjet je za sigurnost broda te udobnost putnika i posade. Akceleracije uslijed njihivanja broda zbog valnih opterećenja potrebno je što točnije predvidjeti zbog dinamičkog opterećenja konstrukcije broda uslijed djelovanja palubne opreme, nadgrađa i drugih teških predmeta na brodu. Osim gibanja broda, vrlo je važan dodatan otpor broda koji uzrokuju vjetrovni valovi. Procjena otpora broda na valovima složen je problem, te je viskozni CFD jedina proračunska metoda koja je u mogućnosti potpuno opisati strujanje oko broda na valovima, pri čemu se uzimaju u obzir viskozni, turbulentni i vrtložni utjecaji. Otpor broda na valovima utječe na odabir snage glavnog porivnog stroja broda, te je važan prilikom procjene energetske učinkovitosti broda. U brodograđevnoj industriji već postoji tendencija optimizacije brodske forme obzirom na otpor na valovima.

Računalna dinamika fluida bazirana na viskoznim modelima strujanja vrlo je proračunski zahtjevna, zbog čega je optimizacija brodske forme na valovima pomoću CFD-a otežana. Potrebno je pronaći načine ubrzavanja metode kako bi se mogao provesti veliki broj proračuna u razumnom vremenu, što bi omogućilo usporedbu pomorstvenih karakteristika većeg broja varijanti brodskog trupa.

U ovom radu prikazana je mogućnost brzog proračuna pomorstvenosti broda pomoću viskoznog CFD-a. Eksplicitna propagacija nailaznog vala pomoću dekompozicije rješenja omogućuje veliki vremenski korak bez prigušenja valova, pri čemu se računa samo razlika rješenja između nametnutog potencijalnog valnog polja strujanja i potpunog nelinearnog viskoznog rješenja. Dekompozicija rješenja provodi se pomoću SWENSE metode (eng. „*Spectral Wave Explicit Navier Stokes*“) [1]. Osim velikog vremenskog koraka, ubrzanje se postiže i polu-implicitnom spregom polja strujanja i jednadžbi gibanja krutog tijela [2], pri čemu se obične diferencijalne jednadžbe gibanja tijela rješavaju nakon svake korekcije tlaka. Takva sprega omogućuje znatno manji broj iteracija sprege polja strujanja i gibanja tijela, što smanjuje vrijeme proračuna i do četiri puta. Velika stabilnost simulacija omogućena je korištenjem implicitnog dinamičkog rubnog uvjeta na slobodnoj površini pomoću „*Ghost Fluid Method*“ (GFM) [3], koja otklanja probleme nefizikalne brzine u zraku.

Ovaj rad organiziran je na sljedeći način. U sljedećem poglavlju ukratko je opisan numerički model korišten u sklopu programa otvorenog koda foam-extend. U trećem poglavlju prikazani su testni slučajevi pomorstvenosti broda te su uspoređeni rezultati te vrijeme proračuna koristeći standardne postavke te postavke za minimizaciju vremena proračuna. Na kraju rada je dan kratak zaključak.

2 NUMERIČKI MODEL

U radu je korišten Naval Hydro programski paket koje se zasniva na programu otvorenog koda foam-extend, grane programa OpenFOAM [4], koji koristi metodu kontrolnih volumena (eng. „*Finite Volume*“, FV) drugog reda točnosti u prostoru s mogućnošću korištenja proizvoljne poliedarske diskretizacijske mreže. Naval Hydro je programski paket specijaliziran za dvofazne probleme velikih prostornih skala kakvi su uobičajeni u brodogradnji i pomorskoj tehnici.

Strujanje je opisano pomoću Navier-Stokesovih jednadžbi i jednadžbe očuvanja mase, iz kojih proizlaze jednadžbe za polje brzine i tlaka. Rješenje brzine i tlaka postiže se iterativno pomoću PIMPLE algoritma, koji je kombinacija SIMPLE (eng. „*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*“) i PISO (eng. „*Pressure Implicit with Splitting of Operators*“), pri čemu se u jednom vremenskom koraku vrši više PISO iteracija. Prilikom jedne PISO iteracije rješava se jednadžba brzine te se jednadžba tlaka rješava više puta, pri čemu se polje brzine korigira eksplicitno.

Slobodna površina se modelira pomoću „*Level Set*“ (LS) metode [5], gdje se koristi funkcija udaljenosti od slobodne površine kako bi se definirao njen položaj. Tokom proračuna se rješava dodatna transportna jednadžba za LS varijablu koja sadrži dodatne članove za implicitnu inicijalizaciju LS varijable, tj. održavanje karaktera funkcije udaljenosti.

Dekompozicija rješenja postiže se pomoću SWENSE metode [1] pri čemu se varijable rastavljaju na eksplicitnu komponentu koja je propisana pomoću potencijalnih valnih te perturbacijsku komponentu koja predstavlja razliku rješenja nelinearnog viskoznog strujanja i pojednostavljenog modela potencijalnog strujanja. Takvom dekompozicijom smanjuje se zamiranjje valova uslijed numeričke difuzije zbog čega se mogu koristiti znatno grublje prostorne proračunske mreže te veći vremenski korak.

Diskretizacijske sheme koje se koriste u Naval Hydro paketu koriste implicitan tretman dinamičkog rubnog uvjeta na slobodnoj površini pomoću GFM [3] koji

propisuje da je tlak kontinuiran preko slobodne površine, te da polje gradijenta tlaka i gustoće imaju skok na slobodnoj površini. GFM omogućuje vrlo stabilne simulacije jer odstranjuje poznati problem velikih nefizikalnih brzina u zraku u dvofaznim modelima, koji znatno usporava proračun te ga čini netočnijim i nestabilnijim.

Jednadžbe gibanja krutog tijela rješavaju se prije svake PISO petlje, te se brzina gibanja tijela nameće kao rubni uvjet brzine na granicama gibajućeg tijela, te se cijela proračunska mreža pomiče kao kruto tijelo. Nakon svakog rješenja jednadžbe tlaka unutar PISO petlje, provodi se rješavanje jednadžbi krutog tijela te se nameće brzina gibanja tijela na granicu tijela, dok se položaj proračunske mreže ne mijenja, kako bi se uštedjelo na proračunskom vremenu. Ovakva sprema dovodi do brže konvergencije polja tlaka i gibanja krutog tijela, zbog čega je potrebno koristiti manje PISO iteracija po vremenskom koraku u odnosu na uobičajenu metodu gdje se gibanje krutog tijela računa jedan put po PISO petlji.

Turbulencija se modelira pomoću $k - \omega$ SST modela turbulencije [6], koji koristi dvije dodatne skalarnе transportne jednadžbe za turbulentnu kinetičku energiju k i vremensku skalu turbulencije ω , na temelju kojih se računa turbulentna viskoznost.

3 SIMULACIJE POMORSTVENOSTI BRODA

U ovom poglavlju prikazane su simulacije pomorstvenosti broda te njihovi rezultati. Naglasak je na usporedbi rezultata sa eksperimentalnim podacima te proračunskog vremena kako bi se istaknula mogućnost korištenja CFD-a za brze proračune pomorstvenosti broda. Detaljna validacija simulacija pomorstvenosti broda pomoću Naval Hydro paketa sa studijom konvergencije mreže može se pronaći u [7].

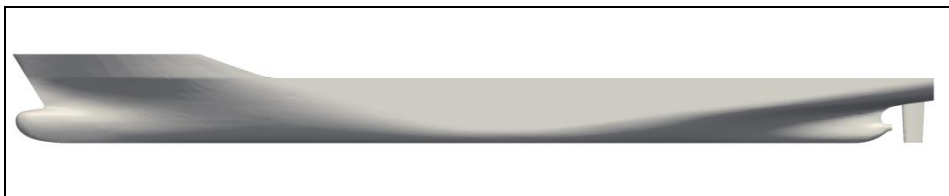
3.1 Postavke simulacija

Za simulacije je korišten model broda KCS (eng. „*KRISO Container Ship*“) za koji postoje javno dostupni eksperimentalni podatci pomorstvenosti broda. Provedene su dvije simulacije s istim parametrima nailaznog vala i istom brzinom napredovanja broda, međutim u jednoj simulaciji su korištene uobičajene postavke najbolje prakse, dok su u drugoj simulaciji korištene postavke s ciljem smanjenja proračunskog vremena.

Simulacije su provedene za model KCS broda dužine $L_{pp} = 6.07$ m, širine $B = 0.85$ m, te gaza $T = 0.285$ m. Kormilo je postavljeno na 0° zakreta, te je model tegljen konstantnom brzinom kao u eksperimentu, pri čemu vijak nije simuliran. Sl. 1 prikazuje geometriju forme broda koja je korištena u simulaciji. S obzirom na to da se može pretpostaviti simetrično strujanje oko uzdužne centralne vertikalne ravnine, samo pola domene je modelirano, pri čemu je na uzdužnoj centralnoj ravnini korišten rubni uvjet simetrije. Kao u eksperimentu, posrtanje i poniranje modela su dopušteni dok su ostali stupnjevi slobode spriječeni. U prvoj simulaciji je korištena mreža s 1.6 milijuna ćelija te je korišteno 400 vremenskih koraka po nailaznom periodu vala, dok je u drugoj korišteno samo 600,000 ćelija te svega 25 vremenskih koraka po nailaznom periodu vala. Također, u prvoj simulaciji je korišteno 6 PISO iteracija po vremenskom koraku, dok su u drugoj korištene samo dvije.

Simulacije su provedene pri projektnom Froudeovom broju $F_r = 0.26$, odnosno pri brzini modela od $v = 2.017$ m/s. Karakteristike nailaznog vala su: valna duljina $\lambda = 11.84$ m, valna visina $H = 0.196$ m, te valni period $T = 2.7$ s.

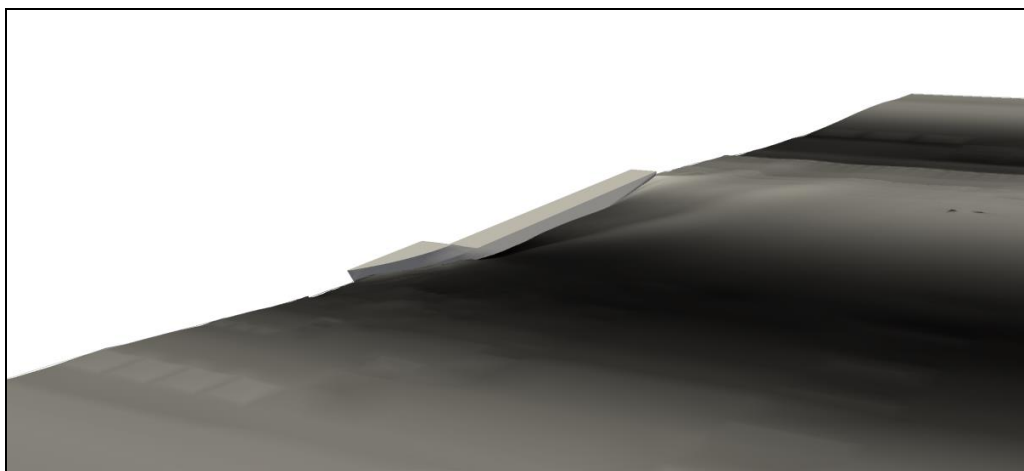
Simulacije su provođene na 56 procesorskih jezgri procesora Intel Xeon E5 2637 v3.



Sl. 1. Prikaz geometrije trupa KCS-a.

3.2 Rezultati simulacija

U simulacijama je mjereno posrtanje i poniranje te otpor broda, tj. hidrodinamička sila koja djeluje na trup u smjeru uzdužne osi. Na Sl. 2 prikazan je jedan vremenski trenutak simulacije pomorstvenosti, gdje se vidi nailazni val te val uzrokovan napredovanjem broda. Rezultati obje simulacije uspoređeni su s eksperimentalnim podacima u Tab. 1, gdje z označava amplitudu poniranja, φ amplitudu posrtanja, dok je R_T srednji otpor broda. T_{CPU} je ukupno proračunsko vrijeme simulacije, dok je N_T broj simuliranih perioda, što čini T_{CPU}/N_T potrebno proračunsko vrijeme po jednom nailaznom periodu vala. Simulacija 1 označava simulaciju s uobičajenim postavkama, dok simulacija 2 označava simulaciju s postavkama za minimalno proračunsko vrijeme.



Sl. 2. Prikaz simulacije pomorstvenosti.

Tab. 1. Usporedba rezultata i proračunskog vremena.

	z , m	φ , °	R_T , N	T_{CPU}/N_T , min
Simulacija 1	0.8719	1.0314	11.103	41
Simulacija 2	0.7908	0.9721	14.600	0.93
Eksperiment	0.9312	1.1185	10.842	/

Iz Tab. 1 je vidljivo da su rezultati simulacije 1 vrlo blizu eksperimentalnih rezultata, dok rezultati simulacije 2 lošije predviđaju otpor broda, dok je gibanje vrlo dobro procijenjeno. Međutim, vidljivo je da je potrebno proračunsko vrijeme za simulaciju 2 više od 40 puta kraće nego za simulaciju 1, te je potrebno manje od minute za jedan nailazni period vala. Obzirom da je za konvergenciju periodičnosti gibanja i otpora broda potrebno simulirati oko 30 valnih perioda [7], s postavkama za minimizaciju proračunskog vremena potrebno je svega pola sata za simulaciju pomorstvenosti.

4 ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je mogućnost provedbe brzih simulacija pomorstvenosti broda pomoću viskoznog CFD programa foam-extend.

Proračunsko vrijeme simulacije znatno je skraćeno koristeći veliki vremenski korak, grubu proračunsku mrežu, te mali broj PISO iteracija po vremenskom koraku. Kako bi se utvrdila točnost i brzina takvog proračuna, rezultati su uspoređeni sa simulacijom uobičajenih postavki, te s eksperimentalnim podacima. Rezultati svjedoče da se uz manji gubitak točnosti može dobiti ubrzanje od 40 puta pri čemu proračun pomorstvenosti traje svega pola sata, što omogućuje provedbu skoro 50 simulacija pomorstvenosti u jednom danu.

Brze simulacije pomorstvenosti uz potpuno razrješavanje nelinearnih, viskoznih i vrtložnih utjecaja, te utjecaja slobodne površine mogu biti temelj optimizacije brodskih formi obzirom na otpor na valovima, što postaje sve važniji čimbenik prilikom projektiranja broda. Prikazani proračunski model može se koristiti za usporedbu pomorstvenih karakteristika više varijanti trupova broda u razumnom vremenu, bez uvedenih pojednostavljanja fizikalnog modela strujanja fluida.

Literatura:

- [1] Vukčević V, Jasak H, Malenica Š. Decomposition Model for Naval Hydrodynamic Applications. Submitted to Ocean Engineering. 2015.
- [2] Gatin I, Vukčević V, Jasak H, Rusche H. Semi-implicit Coupling of Fluid Flow and Solid Body Motion in Computational Fluid Dynamics. In preparation. 2016.
- [3] Huang J, Carrica PM, Stern F. Coupled Ghost Fluid/Two-Phase Level Set Method for Curvilinear Body-Fitted Grids. Int. J. Numer. Meth. Fluids. 2007; 44: p. 867-897.
- [4] Jasak H. OpenFOAM: Open Source CFD in Research and Industry. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2009;(2): p. 89-94.
- [5] Sun Y, Beckermann C. Sharp interface tracking using the phase-field equation. J. Comput. Phys. 2007;(220): p. 626-653.
- [6] Menter FR. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering. AIAA J. 1994; 32(8): p. 1598-1605.
- [7] Vukčević J, Jasak H. Seakeeping Validation and Verification using Decomposition Model based on Embedded Free Surface Method. In Tokyo 2015: A workshop on CFD in Ship Hydrodynamics; 2015

Autori:

Inno Gatin, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, tel. 01/6168-239, e-mail: inno.gatin@fsb.hr

Vuko Vukčević, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, tel. 01/6168-239, e-mail:vuko.vukcevic@fsb.hr

Hrvoje Jasak, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, tel. 01/6168-239, e-mail:hrvoje.jasak@fsb.hr